

FRP 복합재료 선박의 구조강도 평가에 관한 연구

A Study on the Structural Strength Assessment of FRP Composites Boat

최한규^{†*}, 권수연^{*}

Han-Kyu Choi^{†*}, Soo-Yeon Kwon^{*}

요 약 문

플레저보트의 고강도 및 경량화 추세에 따라 복합재료 등 관련 소재의 경량화가 요구되었고, 이에 부응하여 관련 신소재 개발과 진공성형 신건조공법 등이 출현하였으며, 이러한 신공법을 이용한 선박건조가 증가하고 있는 실정에 따라 선박의 구조강도 평가가 중요한 과제로 부각되고 있다.

또한 선박의 안전성 확보와 고객의 편리 도모를 위한 플레저보트 구조강도 확인을 위한 시험 방법 등도 다양화할 필요가 있다. 따라서 진공적층 및 수적층 성형방법으로 건조한 플레저보트를 대상으로 선체구조 강도 시험 결과를 비교 분석하여 우리 실정에 적합하고 플레저보트의 안정성 평가를 위한 선체구조 강도 시험 기준안을 제시하고자 한다.

※ **핵심용어** : 다축(Multi axial)섬유, 진공적층, 섬유함유율, 등분포하중, 로드셀, 변형량, 다이얼게이지

1. 서 론

1.1 연구 배경

플레저보트의 경우 고속화 및 경량화가 요구됨에

따라 고강도 다축유리섬유(Multi-axial) 등의 다양한 복합재료가 급속히 발전하게 되었으며, 기존 부재 등의 취부 방법인 Overlay 방식을 채택하지 않고 접착제로 취부 하는데 필요한 고강도의 접착제가 출현하는 등 선박용 접착제의 눈부신 발전을

* 선박안전기술공단 기술연구팀

† 논문 주저자

이룩하였다.

이와 같이 레저선박용 복합소재가 다양하게 개발됨에 따라 새로운 공법인 진공적층 성형 방법이 출현하게 되었으며, 이러한 공법은 작업시간 단축, 경량화, 고강도 및 균일한 성형 제품생산이 가능할 뿐만 아니라 친환경적이며 적은 인력을 이용함으로써 인건비 절감 등 여러 가지 우수한 점이 많아 외국 등에서는 오래전부터 동 공법을 플레저보트 건조에 사용하고 있고, 국내 조선소에서도 이러한 장점 때문에 진공성형방법을 점차 도입하는 사례가 증가함에 따라 선박의 구조강도 확인 또한 중요한 과제로 부각되고 있으며 선박의 안정성 확보차원에서 구조강도 시험 등도 다양화할 필요가 있다.

외국에서는 플레저보트의 안전을 위하여 “외판 두께 측정에 의한 선체구조 강도 시험”, “등분포 하중에 의한 중급힘 시험방법”과 “로드셀에 의한 중급힘 시험방법 및 동성적서”, “낙하시험” 등 다양한 방법으로 선체의 강도를 확인하고 있다.

국내에서도 외판 두께 측정에 의한 선체구조 강도 시험과 낙하시험에 의한 구조강도 기준 도입 및 국제표준규격(ISO)을 수용하는 등 강화플라스틱(FRP)선의 구조기준(2008. 11. 10 국토해양부고시 제2008-648호)이 개정되었다. 그러나 레저보트 건조에 다양한 신소재와 새로운 건조공법 출현 등에 따라 판두께 측정 시험 및 낙하시험 방법만으로 구조강도를 확인하기에는 어려움이 있는 실정이다. 이러한 어려움을 해소하기 위하여 국내조선소에서 건조하는 선박을 대상으로 선체 구조강도에 대한 시험 방법 검증이 필요하며, 또한 검사시 고객이 다양한 검사방법을 선택할 권리 부여 및 편리도를 위하여 외국에서 사용하고 있는 중급힘 시험 등 다양한 구조강도 시험방법 등을 조기에 도입할

필요가 있다. 따라서 신공법인 진공적층 건조에 직접 참여하여 고강도, 균일한 성형품 생산가능 여부뿐만 아니라 경제성이 있는지 등 객관적인 기초자료를 확보하고, 기존 건조방법인 수적층 법과 신공법인 진공적층 법으로 건조한 레저선박을 대상으로 현행 기준의 문제점 개선안 도출과 외국 기준 등 다양한 선체구조 강도 시험 결과를 비교 분석한 자료를 반영하여 플레저보트의 안정성 확보에 적합한 선체 구조 강도 시험기준을 제시하고자 한다.

2. 시험선 제작

2.1 복합재료의 기계적 특성

복합재료의 내부에 섬유가 어떤 분산 또는 배열 형식을 취하게 할 것인가를 결정하는 것은 복합재료 구조의 설계에 있어서 기본이 되는 중요한 문제이다. 또한 일방향의 배향을 갖는 복합재료(일방향 복합재료)는 섬유의 탄성률·강도가 섬유 배향 방향에서 가장 효과적으로 나타나고, 복합재료의 역학적 성질은 섬유의 체적 함유율에도 크게 의존하며, 시험선 제작에 사용한 유리섬유의 기계적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 다축유리섬유의 기계적 특성

	품 명	인장 강도 (MPa)	인장 탄성률 (GPa)	굽힘 강도 (MPa)	굽힘 탄성률 (GPa)
Bi-Axial	LT600	173	10.9	326	7.48
Double-Bias	DB400-E06	99.4	7.88	213	6.15
	DB600-E06	107	8.43	191	4.71

2.2 수지 기계적 특성

세원화성에서 생산하는 진공적층용 불포화 폴리 에스테르 R4520, 4520AP 등의 수지가 선박용 으로 많이 사용되고 있으며, 시험선 제작에 사용한 R4520 수지의 기본성질은 Table 2와 같다.

Table 2 수지의 기본 성질(세원화성)

특 성 \ 제 품 명	R4520	4520AP
비중	1.08~1.12	1.08~1.12
점도(mPa.s)	1.0~1.4	0.7~1.5
불휘발분함량(%)	38~42	55~60
인화점(℃)	31	31
겔화시간(분)	30~100	7~50
최소경화시간(분)	40~150	10~70

2.3 진공적층 용 재료

2.3.1 Flow Mat

그물처럼 일정한 방향으로 짜여진 가는 나일론 필라멘트 직물로서 몰드표면과 유리섬유 사이에 수지가 원활하게 침투되도록 도와주는 역할을 한다.



Fig. 1 플로우 매트

2.3.2 Peel Ply

성형품의 표면을 깨끗하게 하여 마무리 작업이 필요없도록 하는 역할을 하며, 최종 성형품과 분리 에도 용이하도록 도와준다.



Fig. 2 필 플라이

2.3.3 Spiral Tube

진공 성형시 수지의 흐름을 원활히 할 수 있도록 나선형 커팅 라인으로 형성된 것으로, 나선형 튜브사이로 수지가 고르게 방출될 수 있도록 하는 역할을 한다.



Fig. 3 스파이럴 튜브

2.3.4 Tacky Tape

공기 누출 방지 테이프, 다양한 표면에 사용이

용이하며, 경화 후에는 테이프를 쉽게 제거할 수 있다.



Fig. 4 공기 누출 방지용 테이프

2.3.5 Bagging Film

신축성이 우수하고, 잘 찢어지지 않는 성질의 비닐로 진공을 형성할 때 사용할 수 있도록 제작된 특수 진공용 비닐이다.



Fig. 5 진공용 비닐

2.4 기타

2.4.1 구조용 접착제의 기계적 특성

구조용 접착제는 복합재료를 접착하는데 있어 쉽고 빠르게 작업할 수 있고 강하면서도 내구성이 우수하며, 시험선의 접합부에 사용한 접착제의 기

계적인 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 접착제의 기계적 물성(PLEXUS)

제품명	색상	혼합비	점도 (CP)	가사 시간 (분)	경화 시간 (분)	인장강도 (psi)	전단강도 (psi)
MA 422	청	10:1	100,000 125,000	17~24	35~40	2000~ 2500	1500~ 1800
MA 425	청	10:1	100,000 125,000	30~35	80~90	2000~ 2500	1500~ 1800

2.5 시험선의 성형 방법

복합재료, 수지 등과 Peel ply, 진공백, 진공 테이프, 진공용 호스 및 진공펌프 등의 재료와 진공 적층 성형방법으로 광동FRP산업에서 건조하였으며, 건조 공정별 방법은 다음과 같다.

2.5.1 몰드 이형처리

이형제는 강화재를 배치하고 수지를 주입한 후 경화가 완료된 후, 선체를 탈형할 때 몰드와 성형된 선체의 분리가 잘되어 탈형이 쉽고 겔코트 도포한 색상을 잘 유지하여 미려한 선체가 보존되도록 하는 역할을 하고, Fig. 6은 이형제 처리 작업을 완료한 상태의 모습이다.



Fig. 6 이형제 처리

2.5.2 강화재 재단 및 배치

겔코트 작업이 끝나면 설계도서에서 요구하는 각 부분의 두께와 같은 강화재를 재단하여 선체부분의 겹침 및 코너에 배치하는 규정에 적합하게 6 ply가 되게 겹쳤으며, Fig. 7은 여러 층의 유리섬유 배치를 하는 장면이다.



Fig. 7 유리섬유 배치

2.5.3 Peel ply 배치

Peel ply는 최종 강화재를 배치한 다음에 덮는 것으로 표면 마감 작업을 생략 할 수 있는 역할을 한다. 몰드 반대편 적층시 사람이 걸어 다니거나 이물질 등으로 인하여 표면이 거칠게 성형됨에 따라

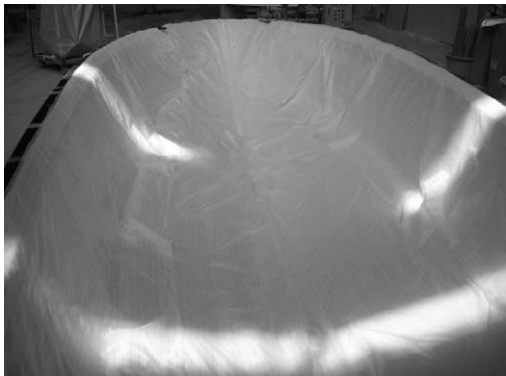


Fig. 8 Peel Ply 배치

이러한 것을 제거하기 위한 표면 사상 작업과 겔코트 등을 다시 도포하여야 하는 시간과 비용이 많이 들어가는 단점을 보완해 주며, Fig. 8은 Peel ply를 배치한 모습이다.

2.5.4 플로우 매트 배치

플로우 매트는 일정한 방향으로 그물과 같이 직조된 나일론 필라멘트 직물로서 유리섬유 사이에 수지를 원활하게 흐를 수 있도록 도와주는 역할을 하며, Fig. 9는 플로우 매트를 배치 완료한 장면이다.

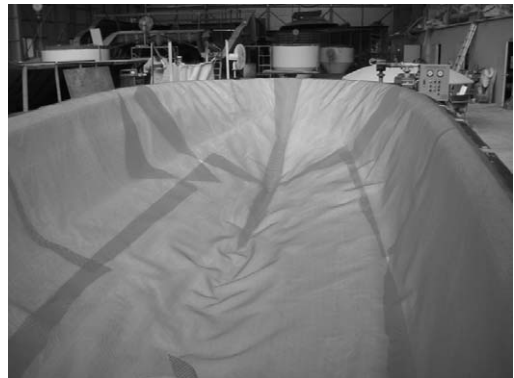


Fig. 9 플로우 매트 배치

2.5.5 Spiral Tube

수지주입 및 함침이 용이하도록 스파이럴 튜브(수지 통로 파이프)를 사용하고, 수지가 충분히 주입될 수 있도록 스파이럴 튜브의 간격을 배치하며, 스파이럴 튜브가 찌그러지지 않도록 설치하여야 한다. Fig. 10은 스파이럴 튜브를 설치한 모습이다.

2.5.6 진공 비닐 배치

진공 비닐은 수지를 강화재에 함침시키기 위한



Fig. 10 스파이럴 튜브 설치

밀봉역할을 하고, 진공 비닐 재단은 선체 총길이보다 다소 길게 하여 진공압이 걸릴 때 찢어지지 않도록 여유를 주어야 하며, Fig. 11은 진공비닐을 배치하고 있는 모습이다.



Fig. 11 진공 비닐 배치

2.5.7 진공 형성

진공 비닐을 덮는 작업과 비닐을 몰드에 부착하는 과정이 마무리 된 후 진공펌프를 가동하여 진공을 형성하고, 누공여부를 장비를 이용하여 정밀하게 체크를 하여야 하며, 또한 주입/배출구 부분에 비닐이 당겨지지 않도록 충분한지를 점검한다. 만약 세는 곳이 있으면 택키 테이프를 이용하여 진공이

확실하게 형성되도록 세는 틈을 없애야 한다. 이러한 진공 형성이 제품의 질을 결정하는 데 중요한 역할을 하며, Fig. 12는 진공펌프를 가동하여 진공을 형성하는 과정의 모습이다.

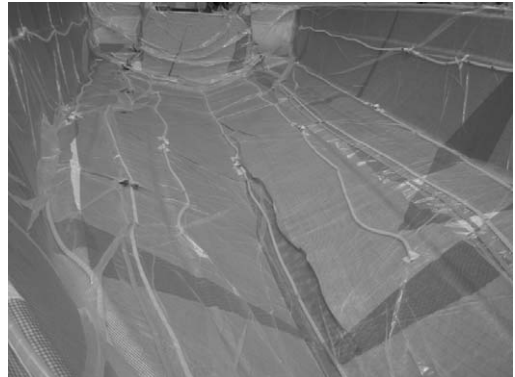


Fig. 12 진공 형성 과정

2.5.8 수지 주입

수지주입 중 누공이 발생하면 수지 주입이 잘 되지 않아 제품에 치명적인 결함이 발생할 우려가 높으므로 수지주입의 이상여부를 잘 체크하여야 하며, 수지 주입에 문제가 있으면, 누공으로 의심하고 반드시 확인을 하여야 한다. 수지주입은 선저 용골에 설치된 튜브부터 주입을 실시하여 압에 의해 수지가 선저 중앙부 전체에 고르게 함침 된 후 선저 측면 두 곳의 튜브를 열어 수지가 주입되게 하며, 그 다음 양 체인 라인 쪽 튜브를 열어 수지가 주입 되도록 하고 마지막으로 선측 양현 튜브를 열어 수지가 흘러들어 가도록 한다. 이와 같이 선체 전체에 수지가 고르게 함침되도록 수지 주입 시기를 잘 선택하여야 하는 등 세심한 주의가 필요하고, 수지가 유리섬유 전체에 고르게 잘 함침이 되어 선체 성형에 문제가 없고 수지 주입이 더 이상 필요 없을 경우에는 각 수지 주입튜브를 차단한다. Fig. 13은 수지

주입 튜브로 수지가 주입되고 있는 모습이며, Fig. 14는 수지 주입 완료된 장면이다.

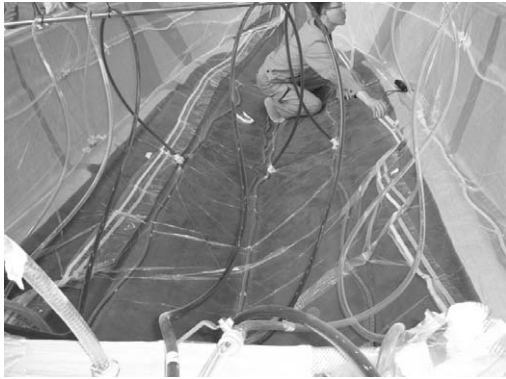


Fig. 13 수지 주입 장면



Fig. 14 수지 주입 완료

2.5.9 진공백 및 Peel ply 제거

수지 주입이 전체적으로 고르게 함침되어 선체 성형에 문제가 없고, 제조사가 제시하는 최소경화 시간을 경과한 후 경화가 완전하게 된 연후에 수지 주입용 호스, 진공용 호스, 진공 비닐 및 Peel ply를 제거하여 선체 탈형 준비를 하여야 한다. Fig. 15는 경화가 완료된 후 진공백 및 Peel ply를 제거하고 있는 모습이다.

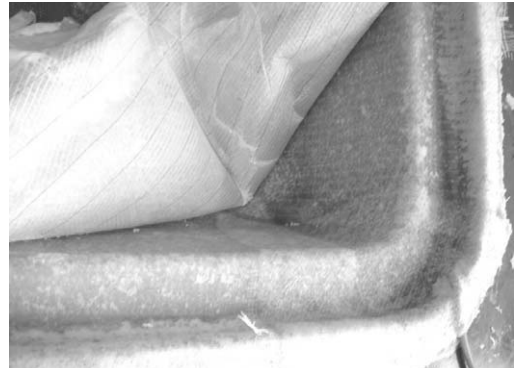


Fig. 15 진공백 및 Peel ply 제거

2.5.10 선체와 데크 접합

선체와 데크 결합에 앞서 선체에 데크가 놓일 부분에 구조용 접착제를 적당한 두께로 고르게 도포하고, 선체에 도포된 접착제 위에 데크를 얹고 바인더 등의 기구를 이용하여 선체와 데크가 결합 되도록 시공하는 공법이며, Fig. 16은 진공적층 한 선체로써 좌측은 선체위에 접착제를 도포하는 장면이고, 우측은 선체와 데크 결합을 좋게 하기 위하여 바인더 등으로 쪼이는 작업을 하고 있는 모습이다.



Fig. 16 선체와 데크 결합

2.7 시험선 완성

시험선은 다축유리섬유(DB600+CM/F/CM225/F135/CM225)×3, 총 6ply, 세원화성 R4520 불포화 폴리에스테르수지를 사용하였으며, 적층 후 데크와 선체 접합에는 구조용 접착제 M425 제품을 사용

하여 부산시 소재 광동FRP산업에서 진공적층으로 완성하였다. Fig. 17은 진공적층 성형방법으로 건조한 레저선박의 모습이다.



Fig. 17 진공적층으로 완성된 시험선 모습

2.8 시험선 완성 결과 요약

동일 몰드에서 건조한 수적층이 진공적층보다 선체 무게가 19.21% 무겁게 나타났으며, 이러한 결과는 진공적층 공법으로 건조하는 방법이 수지량 소모가 적다는 의미이다.

따라서 진공적층은 복합재료의 전체 두께와 무게를 줄일 수 있으므로 건조 시 재료비, 인건비 및 시간을 절약하는 등 많은 장점이 있고 선박의 안전 확보에 적합한 성형 방법으로 판단된다.

그러나 진공적층에 사용되는 재료들이 수입품이 대부분으로 진공적층의 활성화를 위하여 국산 소재 개발이 시급한 실정이며, 또한 진공적층 성형방법을 국내 조선소에 정착시키기 위해서는 초기 비용이 많이 소요되므로 진공적층에 따른 지원과 진공적층에 대한 기술 등의 지원이 선결되어야 할 것이다.

3. 복합재료 시험편

3.1 유리섬유 시험편(수/진공적층)

유리섬유 DB600, CM225/F135/CM225를 각각 3ply, 총 6layer로 하고, 수지는 세원화성 R4520을 사용하여 수/진공적층한 인장 및 굽힘 시험편 형상은 Fig. 18, 19와 같다.

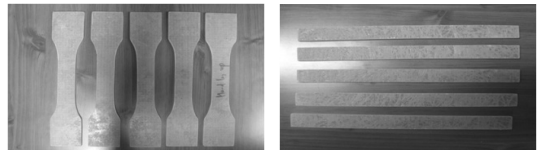


Fig. 18 인장 및 굽힘 시험편(DB+CM/F/CM, 수적층)

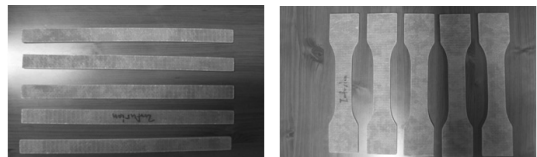


Fig. 19 인장 및 굽힘 시험편(DB+CM/F/CM, 진공적층)

4. 복합재료 특성 평가

4.1 복합재료 시험 방법 및 측정

복합재료에 대한 인장강도 및 굽힘강도 특성을 파악하기 위하여 다음과 같이 시험을 수행하였다.

유리섬유 시험편 강도 측정은 강화플라스틱구조 기준, KSM 3381, ASTM D 3039, 굽힘강도는 강화 플라스틱구조기준, KSM 3382, ASTM D 7264/ASTM D 790에서 요구하는 시험편 길이 및 폭에 적합하게 제작한 시험편에 대하여 인장 및 굽힘 시험 요구 조건에 알맞게 인장속도 0.05in/min, 굽힘속도 t/2mm/min으로 실시하였다.

4.2 복합재료의 강도 등 시험 결과

4.2.1 유리섬유(수적층) 시험 결과

Fig. 20은 다축유리섬유 인장 및 굽힘 시험편 파단 형상(DB+CM/F/CM, 수적층)이고, 인장 및 굽힘 강도-변위 선도는 Fig. 21, 22와 같다.

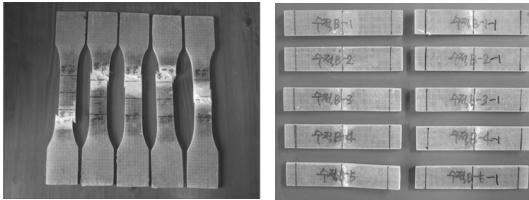


Fig. 20 인장 및 굽힘 시험편 파단 형상(DB+CM/F/CM, 수적층)

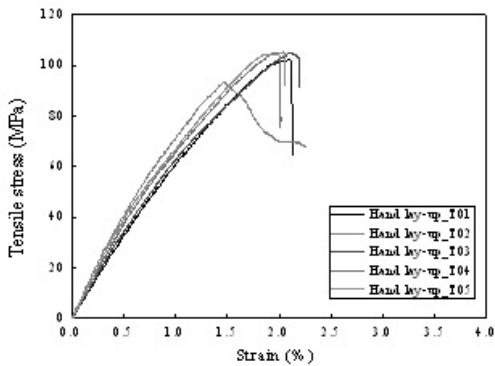


Fig. 21 응력-변형률 선도(DB+CM/F/CM, 수적층)

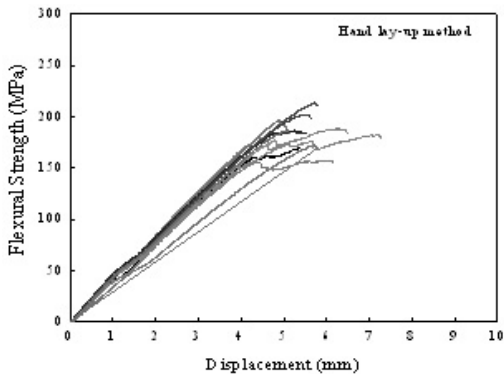


Fig. 22 유리섬유 굽힘강도 선도 (DB+CM/F/CM, 수적층)

4.2.2 유리섬유(진공적층) 시험 결과

Fig. 23은 다축유리섬유 인장 및 굽힘 시험편 파단 형상(DB+CM/F/CM, 진공적층)이고, 인장 및 굽힘 강도-변위 선도는 각각 Fig. 24, 25와 같다.

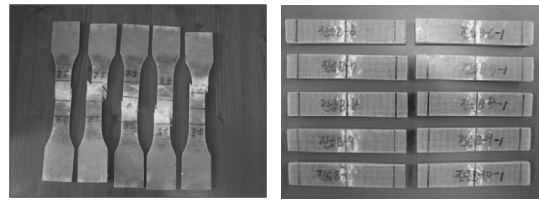


Fig. 23 인장 및 굽힘 시험편 파단 형상(DB+CM/F/CM, 진공적층)

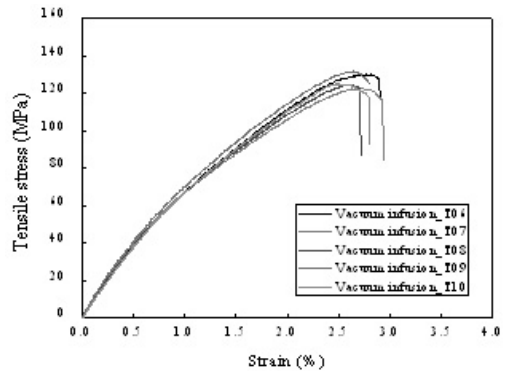


Fig. 24 응력-변형률 선도(DB+CM/F/CM, 진공적층)

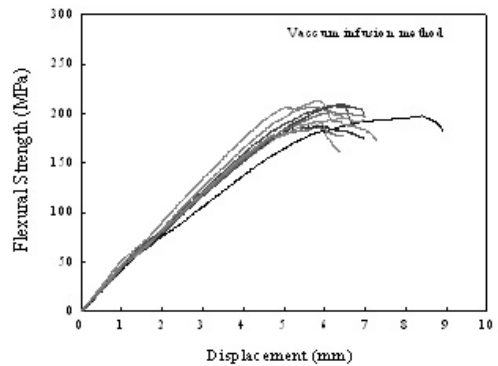


Fig. 25 유리섬유 굽힘강도 선도(DB+CM/F/CM, 진공적층)

4.3 복합재료 특성 평가 요약

4.3.1 복합재료의 인장강도

Fig. 26은 유리섬유의 인장강도를 나타낸 것이다.

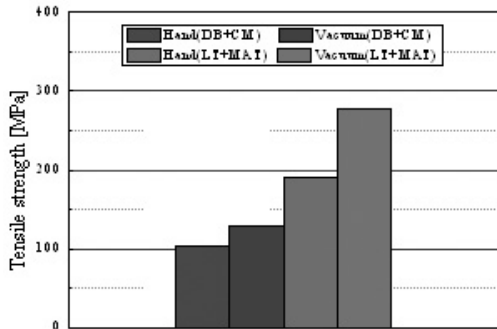


Fig. 26 복합재료 인장강도(DB+CM/F/CM, LT+MAT, 진공 및 수적층)

Fig. 26에서 다축유리섬유(DB+CM225/F135/CM225)의 수적층 평균 인장강도는 103MPa, 진공적층 평균 인장강도는 128MPa이고, 다축유리섬유(LT+MAT)의 수적층 평균 인장강도는 191MPa, 진공적층 평균 인장강도는 279MPa로 나타났으며, 다축유리섬유(LT+MAT)의 인장강도가 수적층보다 진공적층이 약 46% 강하게 나타났다.

4.3.2 복합재료의 굽힘강도

Fig. 27은 유리섬유의 굽힘강도를 나타낸 것이고, Fig. 27에서 다축유리섬유(DB+CM225/F135/CM225)의 수적층 평균 굽힘강도는 186MPa, 진공적층 평균 굽힘강도는 200MPa이고, 다축유리섬유(LT+MAT)의 수적층 평균 굽힘강도는 261MPa, 진공적층 평균 굽힘강도는 391MPa로 나타났으며, 다축유리섬유(LT+MAT)의 굽힘강도가 수적층보다 진공적층이 50% 강하게 나타났다.

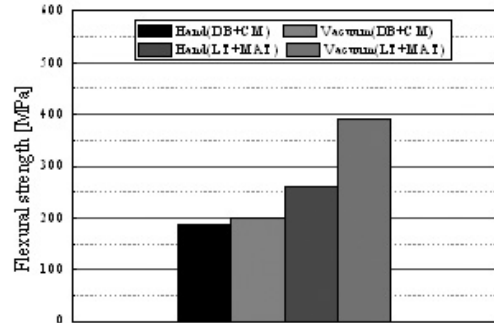


Fig. 27 복합재료 굽힘강도(DB+CM/F/CM, LT+MAT, 진공 및 수적층)

5. 복합재료 선박의 구조강도 시험

5.1 시험선의 구성

시험선은 폴리에스테르 수지 및 유리섬유를 사용한 수적층과 다축 유리섬유, 필 플라이, 플로우 매트, 스파이럴 튜브, 비닐 및 진공제너레이터 등을 사용하여 진공이 형성되면 수지를 주입하는 진공적층(Vacuum Infusion)방법으로 건조하였으며, 각 시험선의 주요 제원은 Table 4와 같다.

Table 4 시험선의 주요 제원 및 상태별 질량

	T1선	T2선	T3선	T4선	T5선	
선체재질	FRP	FRP	FRP	FRP	FRP	
적층방법	수적	진공	수적	수적	수적	
길이(m)	5.53	5.53	7.26	4.46	4.20	
너비(m)	2.15	2.15	2.61	2.00	1.20	
높이(m)	1.30	1.30	1.48	0.80	0.60	
속력(knot)	30	30	46	30	25	
경하 상태	선체질량(kg)	906	760	1400	730	230
	기관질량(kg)	110, 190	110, 190	200	100, 190	50
	프로펠러등(kg)	-	-	50	-	-
	축전지 질량(kg)	20	20	50	20	20
	그외(kg)	-	-	-	-	-
만재 상태	최대탑재인원	420,	420,	350,	420,	140,
	질량(kg)	700	700	700	700	350
	연료질량(kg)	80	80	300	20	20

T1선, T2선:A업체, T3선:B업체, T4선:C업체, T5선:D업체

5.2 시험장치

FRP복합재료 선박의 등분포하중 시험 및 로드셀에 의한 하중시험에 의한 구조강도 평가에 대한 시험장치는 Fig. 28과 같으며, 우측 실선으로 표기된 부분이 등분포하중에 의한 종굽힘 시험방법이고, 좌측 실선으로 표기된 부분이 로드셀에 의한 종굽힘 시험방법으로 나타내고 있다. 등분포하중에 의한 시험에는 하중을 가할 무게(Weight) 및 7개소의 변위차를 측정할 다이얼게이지(Dial Gauge)와 로드셀에 의한 하중시험에는 하중을 측정할 로드셀(Load Cell), 로드셀 표시기(Load Cell Indicator), 선체에 하중을 가할 유압 자키(hydraulic jack)로 구성하였다.

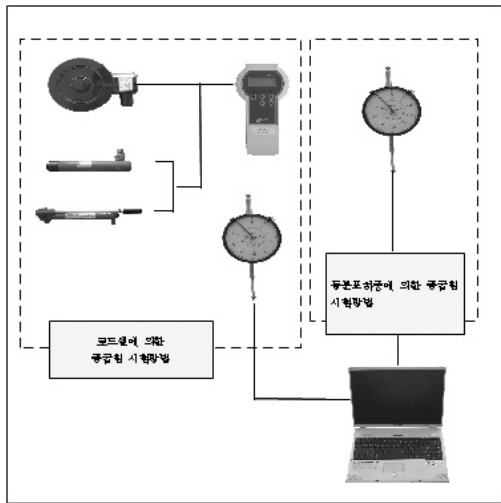


Fig. 28 FRP 복합재료 선박의 구조강도 시험장치

5.3 측정위치 및 방법

5.3.1 등분포하중에 의한 종굽힘

등분포하중에 의한 종굽힘 시험은 경하상태의 선박에 지지대를 받쳐 각 시험조건에 알맞게 산정된

하중을 등분포로 하여 최대변위차를 측정하는 시험 방법으로 우선적으로 지지대를 받치는 지점간 거리를 산정하여야 한다. 선체 두 지점간 거리는 선박의 길이의 60%이상 되도록 하여야 하며, 지점간 거리 산정은 다음 산식에 따라 구한다.

$$\ell = 0.6 \times L, \ell: \text{지점간거리(m)}, L: \text{배길이(m)}$$

등분포하중 시험에 필요한 시험하중 산정은 다음 산식과 같다.

$$W = 1.25(1.00) \times \text{만재상태-경하상태}$$

$$W: \text{시험하중(kg)}, \text{계수값} = V/\sqrt{L}$$

등분포하중에 의한 종굽힘 시험에 필요한 다이얼게이지는 Fig. 29와 같이 선저부 최대변위차를 측정하기 위하여 선저 용골부의 선미, 중앙, 선수부에 3개소, 폭부분의 최대변위차 측정은 양현의 횡방향 2개소 및 깊이의 최대변위차를 측정하기 위해 블워크 상부의 2개소에 총 7개의 다이얼 게이지를 설치한다.

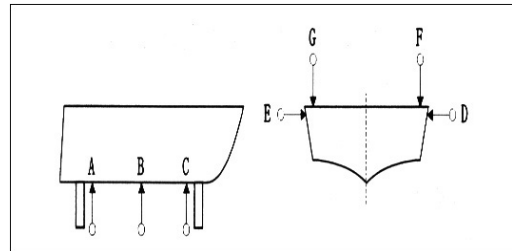


Fig. 29 등분포하중에 의한 다이얼게이지 설치위치

하중방법은 질량이 명확한 철, 콘크리트 블록, 모래, 수지통 등으로 개당 무게를 계측하여야 하고, 하중은 지점간에 등분포하중이 되도록 상갑판 또는 플로어 위에 편하중이 되지 않도록 적재하며, 시험시 기관 그 외의 경하상태에 산입될만한 기기가 미탑재 되었을 때는 그 질량에 상당하는 대체하중을 그 장소에 탑재한다. 또한 하중을 선저에 적재하는

경우에는 선저부에 설치된 다이얼게이지 3개소에 해당하는 길에 직접 영향을 미치지 않도록 늑골간에 판을 놓고 그 위에 하중을 적재한다.

계측방법은 선체 지점간에 지지대를 받치고 하중을 걸기 전에 무하중 시의 다이얼게이지 값을 측정 한 후, 하중을 지점간 사이에 등분포하중이 되도록 적재하고 5분후와 하중을 빼고 3분후에 계측한다.

변형량 등의 계산은 선체에 하중을 가하기전에 무하중시 다이얼게이지 값을 계측한 후와 선체에 균등한 하중을 걸고 5분후에 변위를 측정하여 두 값의 변위차를 구하고, 이 값을 다음 산식에 의거 용골, 폭 및 깊이의 변형량을 계산한 값이 실측치 값이며, 이 실측치는 선체 구조강도의 최종 합부 판정에 사용되는 값이 된다.

가) 용골 변형량 : $B-1/2(A+C)$

나) 폭의 변형량 : $D + E$

다) 깊이의 변형량 : $B+1/2(F+G)$

상기 각 부분의 변형량을 구한 값과 아래 각 위치별 변형량 허용범위를 구한 값과 비교하여 선박의 구조강도 만족여부를 판정한다.

가) 용골 변형량 : $l / 500$ (mm) 이하

나) 폭의 변형량 : $l / 250$ (mm) 이하

다) 깊이의 변형량 : $l / 500$ (mm) 이하,

l : 지점간 거리

5.3.2 로드셀에 의한 종굽힘

로드셀에 의한 종굽힘 시험은 경하상태의 선박에 지지대를 받쳐 각 시험조건에 알맞게 산정된 하중을 선체 하부 용골 중심에 로드셀을 중개로 하여 자기로 서서히 하중을 가하여 최대변위차를 측정하는 시험 방법으로 지점간 거리 산정은 등분포하중 시험 방법과 동일하다.

시험하중은 등분포하중에 의해 구한 값에 0.625를 곱한 값으로 한다.

다이얼게이지 및 로드셀 등의 계측기 설치는 Fig. 30과 같다. 그림에서 중앙에 로드셀 및 자기를 설치하고, 선저 중앙부 다이얼게이지 3개, 폭방향 좌우현 각 1개, 깊이 방향 좌우현 각 1개 총 7개를 설치한다.

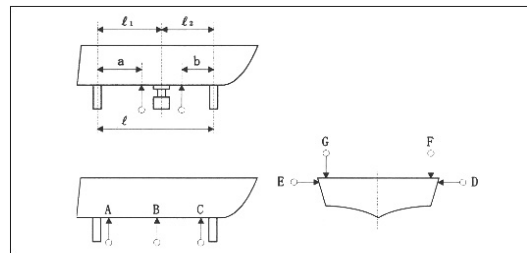


Fig. 30 로드셀에 의한 변형량 측정 계측기 위치

Fig. 30에서 B의 다이얼게이지가 자키보다도 선수측에 있는 경우는 다음 산식 중 $4al_2$ 인 것은 $4al_1$ 으로 대신하여 적용한다.

가) 용골의 변형량

$$d_1 = B-1/2(A+C), \frac{l^2 d_1}{4al_2}$$

a : 선미 지지대에서 중앙에서 선미측에 있는 다이얼게이지까지 거리

d_1 : 킬의 변형량, l : 지점간 거리

l_2 : 선수 지지대 중앙에서 로드셀 중앙까지 거리

나) 폭의 변형량

$$d_2 = D + E, \frac{l^2 d_2}{4al_2} \quad d_2 : \text{폭의 변형량}$$

다) 깊이의 변형량

$$d_3 = B+1/2(F+G), \frac{l^2 d_3}{4al_2} \quad d_3 : \text{깊이 변형량}$$

허용범위 및 판정은 등분포하중에 의한 종굽힘 시험과 마찬가지로 로드셀에 의한 종굽힘 허용 범위는 두 지점간의 거리를 다음 산식으로 구한 용골, 폭 및 깊이의 변형량을 기준으로 사용하며, 변형량에 보정치를 구한 값과 허용범위와 비교하여 선박의 구조강도 만족여부를 판정한다.

- 가) 용골 변형량 : $l/500(\text{mm})$ 이하
 - 나) 폭의 변형량 : $l/250(\text{mm})$ 이하
 - 다) 깊이의 변형량 : $l/500(\text{mm})$ 이하
- l : 지점간 거리

5.3.3 판두께 계측에 의한 강도시험

상갑판의 판두께 계측은 선수로부터 $L/3$, $L/2$, $2L/3$ 지점에서 양현 각 1개소 이상 총 6개소 이상 측정하며, 선측 및 선저외판은 선수로부터 $L/3$, $L/2$, $2L/3$ 지점에서 양현 각 2개소 이상 선측 및 선저외판 각 12개소 이상을 측정한다.

판두께 계측에 의한 강도 시험 판정은 다음 산식과 같다.

$$75 \cdot a \cdot W \cdot L \cdot \alpha \leq 1000 \cdot D \cdot [2 \cdot td \cdot Bd + (ts \cdot D/3) \cdot ((2 \cdot tb \cdot B + ts \cdot D - 2 \cdot td \cdot Bd)/(ts \cdot D + tb \cdot B))]$$

6. 구조강도 시험 결과

6.1 등분포하중에 의한 강도 시험

6.1.1 T1선(A업체, 수적층)

Fig. 31은 T1선의 등분포 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저 하중값에서 최대 하중값까지의 변형량은 2.26~3.89mm로 허용 범위 6.64mm보다 작으므로 구조강도에 만족하게

나타났다.

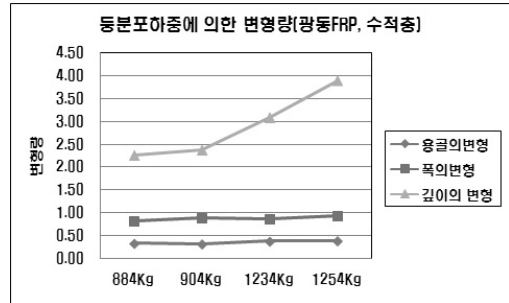


Fig. 31 등분포 하중별 변형량(T1선, 수적층)

6.1.2 T2선(A업체, 진공적층)

Fig. 32는 T2선의 등분포 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저 하중값에서 최대 하중값까지의 변형량은 1.01~2.10mm로 허용 범위 6.64mm보다 아주 작으므로 구조강도는 매우 만족하게 나타났다.

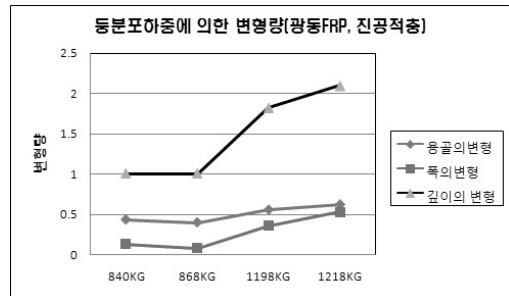


Fig. 32 등분포 하중별 변형량(T2선, 진공적층)

6.1.3 T3선(B업체, 수적층)

Fig. 33은 T3선의 하중 2가지 조건에 대한 변형량 결과로서 깊이의 경우 최저하중 값에서 최대하중 값까지의 변형량은 4.43~5.30mm로 허용 범위 8.71mm보다 작은 값으로 구조강도는 만족하게 나타났다.

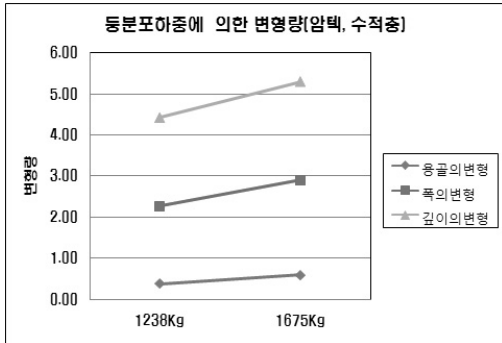


Fig. 33 등분포 하중별 변형량(T3선, 수적층)

6.1.4 T4선(C업체, 수적층)

Fig. 34는 T4선의 등분포 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저하중 값에서 변형량은 3.86mm, 최대하중 값에서 변형량은 5.86mm로 허용범위 5.35mm보다 최저하중 값에서는 허용범위를 벗어나지 않아 구조강도는 매우 만족하게 나타났으나 최대하중 값에서의 변형량은 허용범위를 초과하여 불만족함으로 구조강도 판정에서 불합격으로 나타났다.

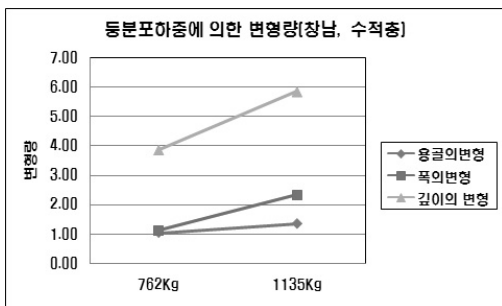


Fig. 34 등분포 하중별 변형량(T4선, 수적층)

6.1.5 T5선(D업체, 수적층)

Fig. 35는 T5선의 등분포 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이

가장 큰 깊이의 경우 최저하중 값에서 변형량은 4.25mm, 최대하중 값에서 변형량은 7.29mm로 허용범위 5.04mm보다 최저하중 값에서는 허용범위를 벗어나지 않아 구조강도는 매우 만족하게 나타났으나 최대하중 값에서의 변형량은 허용범위 5.04mm를 초과하여 불만족하여 구조강도 판정에서 불합격으로 나타났다.

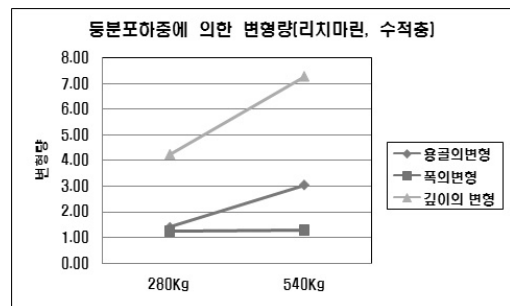


Fig. 35 등분포 하중별 변형량(T5선, 수적층)

6.2 로드셀에 의한 강도 시험

6.2.1 T1선(A업체, 수적층)

Fig. 36은 T1선의 로드셀 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저 하중값에서 최대 하중 값까지의 변형량은 1.66~3.29mm로 허용범위

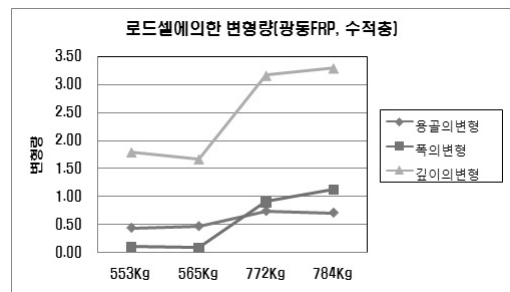


Fig. 36 로드셀 하중별 변형량(T1선, 수적층)

6.64mm보다 아주 작으므로 구조강도는 등분포에 의한 구조강도와 마찬가지로 매우 만족하게 나타났다.

6.2.2 T2선(A업체, 진공적층)

Fig. 37은 T2선의 로드셀 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저 하중값에서 최대 하중값까지의 변형량은 1.66~3.29mm로 허용범위 6.64mm보다 아주 작으므로 구조강도는 등분포에 의한 구조강도와 마찬가지로 매우 만족하게 나타났다.

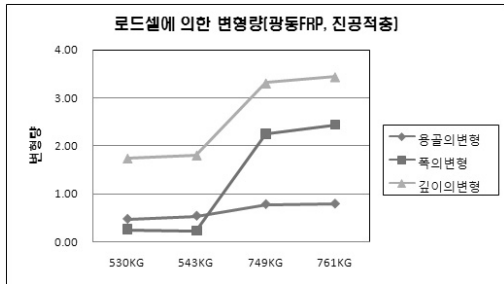


Fig. 37 로드셀 하중별 변형량(T2, 진공적층)

6.2.3 T3선(B업체, 수적층)

Fig. 38은 T3선의 로드셀 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다.

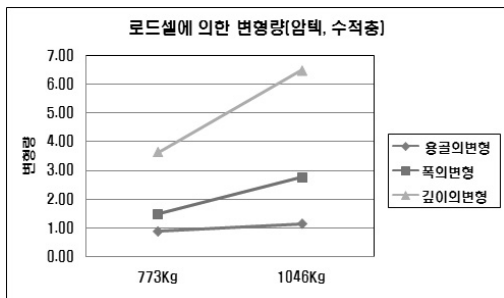


Fig. 38 로드셀 하중별 변형량(T3선, 수적층)

Fig. 38에서 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저 하중값에서 최대 하중값까지의 변형량은 3.65~6.51mm로 허용범위 8.71mm보다 작으므로 구조강도는 만족하게 나타났다.

6.2.4 T4선(C업체, 수적층)

Fig. 39는 T4선의 로드셀 하중별 용골, 폭 및 깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 변형량이 가장 큰 깊이의 경우 최저 하중 값에서의 변형량은 2.81mm로 허용범위 5.35mm보다 아주 작으므로 구조강도는 매우 만족하게 나타났으나, 최대 하중 값에서는 7.09mm로 허용범위 5.35mm를 초과하므로 구조강도는 만족하지 않게 나타났다.

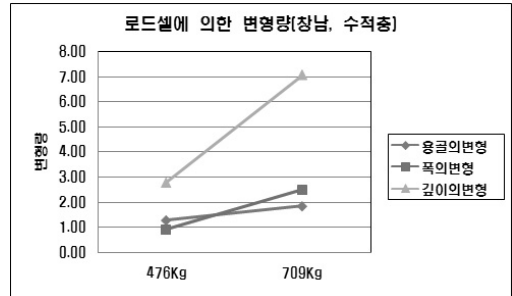


Fig. 39 로드셀 하중별 변형량(T4선, 수적층)

6.2.5 T5선(D업체, 수적층)

Fig. 40은 T5선의 로드셀 하중별 용골, 폭 및

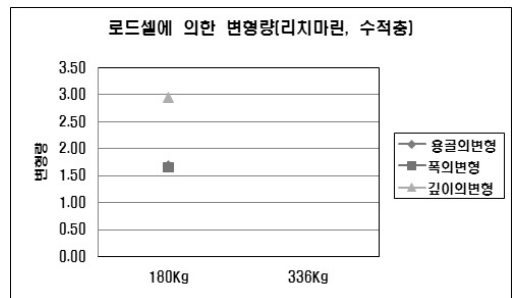


Fig. 40 로드셀 하중별 변형량(T5선, 수적층)

깊이의 변형량의 크기를 나타낸 선도이다. 깊이의 경우 최저 로드셀 하중에서 변형량은 2.95mm로 허용범위 5.04mm보다 작으므로 구조강도는 매우 만족하게 나타났으나 최고 로드셀 하중에서는 선체가 들러 변형량 측정이 불가능하였다.

6.3 판두께 측정에 의한 강도 시험

판두께 측정에 의한 각 선박별 강도시험 결과는 Fig. 41과 같다. Fig. 41에서 T1선, T2선, T3선, T4선 및 T5선의 각 기준강도는 1866.4, 1347.9, 1735.9, 504.6 및 570.9이고, 각 시험선의 계산에 의한 강도는 6148.3, 5167.1, 6472.2, 2168.7 및 974.4로 나타났다. 이러한 값들은 각 선박들의 요구 강도 값을 초과하므로 선체구조강도에는 매우 만족하는 것으로 나타났다.

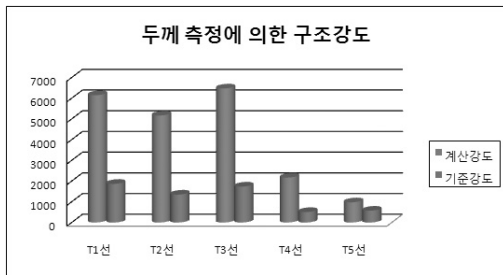


Fig. 41 각 선박별 판두께 측정에 의한 구조강도

6.4 FRP선의 종굽힘 시험 방법 제안

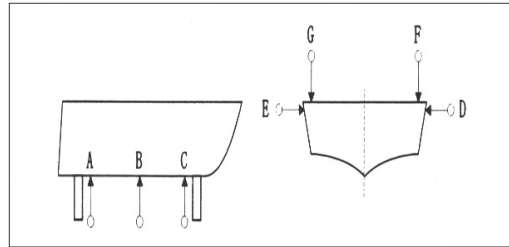
6.4.1 등분포하중에 의한 종굽힘 시험방법

1) 시험하중 등 산정

- 활주정 또는 비활주정 산정($V\sqrt{L}$), 지점간 거리 산정($\ell = 0.6 \times L$), 시험하중 산정($W = 1.25(1.00) \times \text{만재상태} - \text{경하상태}$)

2) 계측기 설치

- 다이얼게이지 7개 설치(용골 3지점, 양현 폭 2지점, 현단 좌우 상 2지점)



3) 하중방법

- 다이얼게이지 7개 설치(용골 3지점, 현단 횡 2지점, 현단 좌우 상 2지점)
- 경하상태에 미 산입 기기의 질량에 상당하는 대체 하중 탑재

4) 계측시기

- 하중을 거는 직전, 하중을 걸고 5분후, 하중을 빼고 3분후 3회 계측한다.

5) 변형량 계산

- 용골 변형량 : $B - 1/2(A+C)$
- 폭 변형량 : $D+E$
- 깊이 변형량 : $B + (1/2)(F+G)$

6) 판정

- 용골/깊이 변형량 허용범위 : $l/500$
- 폭의 변형량 허용범위 : $l/250$

6.4.2 로드셀에 의한 종굽힘 시험방법

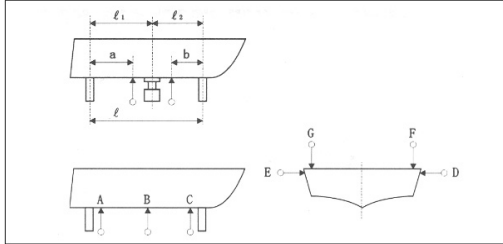
1) 시험하중 등 산정(등분포와 동일)

- 활주정 또는 비활주정 산정, 지점간 거리 산정, 시험하중 산정(등분포하중값에 0.625 곱한 값)

2) 계측기 설치

- 다이얼게이지 7개 설치(용골 3지점, 양현

폭방향 2지점, 현단 좌우 상 2지점)
 - 로드셀 및 자키는 지점간 중앙에 설치



3) 하중방법

- 지점간 중앙에 로드셀을 중개하여 자기로 밀어 올려 하중을 가함

4) 계측방법

- 제1회 : 하중 및 무하중 시, 제2회 : 하중 및 무하중 시, 제3회 : 하중 및 무하중 시 계측(하중과 무하중 읽는 시간은 5분, 제2회와 제3회 사이 30분 크립)

5) 변형량 계산

상기 그림에서 B의 다이얼게이지가 자키보다도 선수측에 있는 경우는 다음 산식 중 $4a_2$ 인 것은 $4a_1$ 으로 대신하여 적용한다.

- 용골 변형량 : $d_1 = B - 1/2(A+C), \frac{l^2 d_1}{4a_1}$

- 폭 변형량 : $d_2 = D + E, \frac{l^2 d_2}{4a_2}$

- 깊이 변형량 : $d_3 = B + 1/2(F+G), \frac{l^2 d_3}{4a_3}$

6) 판정

- 용골/깊이 변형량 허용범위 : $l/500$

- 폭의 변형량 허용범위 : $l/250$

7. 결 론

FRP선체 구조강도 시험, 진공적층 및 복합재료에 대한 기계적 특성을 파악하기 위한 연구 결과는 다음과 같다.

- 1) 진공적층은 수지의 소비량 및 적층수를 줄일 수 있으므로 선체 무게 감소와 복합재료의 전체 두께를 줄일 수 있다. 따라서 고강도, 경량화 및 균일한 성형이 가능하며, 친환경적인 공법으로 복합재료를 이용한 FRP 선박의 안전 확보에 적합한 성형방법이다.
- 2) 강도 확보를 위해서는 복합재료를 이용한 선박 건조시 섬유 배열이 선수미 방향과 동일하게 유리섬유를 배치하여야 한다.
- 3) 진공형성과 수지액의 점도, 겔시간 및 경화 시간은 진공적층에 큰 영향을 미치며, 또한 우수한 성형품을 제작하기 위해서는 수지 제조자가 명시한 바에 따라 선박을 건조하여야 한다.
- 4) 진공적층의 경우가 수적층보다 인장강도, 인장탄성계수, 굽힘강도 및 굽힘 탄성계수가 더 크게 나타났다.
- 5) 섬유함유량은 진공적층의 경우가 수적층의 경우보다 높게 나타났다.
- 6) 판두께 측정에 의한 구조강도 확인은 선체 구조가 단판구조에서만 가능하고, 샌드위치 구조로 건조된 신조선의 기존선인 경우에는 불가능하며, 굽힘강도를 알 수 없는 노후 선박의 선체구조강도 확인 방법으로는 부적합하다.
- 7) 등분포하중에 의한 구조강도 시험 방법은 가벼운 고속정에 유리 하며, 하중의 분배를

잘 고려하여 적재하면 굴곡 모멘트를 선체 전체에 감당하게 하여 구조강도 확인하는 방법이다.

- 8) 로드셀에 의한 구조강도 시험 방법은 쉽게 하중을 걸 수 있으므로 무거운 선박에 편리하고, 구조강도 확인이 용이하다.
- 9) 복합재료 선박의 경우 현행 판두께 측정 및 낙하시험 방법만으로는 선체 구조강도의 확인이 어려움에 따라 선체구조(단판/샌드위치)에 상관없이 등분포하중 및 로드셀에 의한 구조강도 시험 방법으로 선체 구조강도의 안정성을 명확히 규명할 수 있으므로 동 시험 방법을 시급히 도입할 필요가 있다.

참고문헌

- (1) KS M 3381(2004) : 유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법
- (2) KS M 3382(2004) : 유리 섬유 강화 플라스틱의 휨 시험 방법
- (3) ASTM D 3166(2005) : Standard Test Method for Fatigue Properties of Adhesives in by Tension Loading (Metal/Metal)
- (4) ASTM D 3163(2005) : Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joint in Shear by Tension Loading
- (5) ASTM D 3807(2004) : Standard Test Method for Strength Properties of Adhesives in Cleavage peel by Tension Loading (Engineering Plastics-to-Engineering Plastics)
- (6) ASTM D 3039/ D 3039M(2007) : Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix composite Materials
- (7) ASTM D 7264/ D 7264M(2007) : Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix composite Materials
- (8) ASTM D 790(2007) : Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- (9) KST(2005) : Research of Pleasure vessel safety regulation
- (10) 선박안전기술공단(2008) : FRP 선체 복합재료와 구조용 접착제에 대한 실험적 연구
- (11) ISO 14130(1997): Fibre-reinforced Plastics composites-Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method
- (12) KS M 3305(2004) : 섬유 강화 플라스틱용 액상 불포화 폴리에스테르 수지
- (13) 국토해양부(2008) : 강화플라스틱선의 구조기준
- (14) JCI(2007) : 소형선박 안전규칙에 관한 세칙
- (15) RCD Experts group(2008) : APPLICATION GUIDE TO THE AMENDED RECREATIONAL CRAFT DIRECTIVE

이 논문은 선박안전기술공단의 자체연구개발 사업으로 이루어진 것임을 밝힙니다.